

УДК 621.928.9(043.3)

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.128043

## УЗАГАЛЬНЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОННИХ ТА ВИХРОВИХ КАМЕР ПРИ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННІ

Пітак І. В., Шапорев В. П., Пітак О. Я., Брянкін С. С., Васильєв М. І.

Об'єктом дослідження є циклонні та вихрові камери. Пиловловлювачі у виді циклонів та вихрових камер є перспективними для дослідження процесу та удосконалення їх конструкцій. Одними з найбільш проблемних місць є очистка аеродисперсних систем, високий гідравлічний опір, складна експлуатація і установка, необхідність в потужному тягодуттєвому пристрої.

Методи, що застосовуються для очищення аеродисперсних систем від пилу, туману та шкідливих домішок, і необхідна ефективність очищення визначаються санітарними і технологічними вимогами. Також вони залежать від фізико-хімічних властивостей самих домішок, від складу та активності реагентів, від конструктивного рішення пристроїв, які застосовуються для очищення. У зв'язку з цим застосовують різні технології та методи очищення.

В ході дослідження:

- виконано аналіз стану теоретичного опису процесів «сухого» очищення аеродисперсних систем і відомих конструкцій;

- виконано аналіз методів розрахунку ступеня очищення газу від пилу;

- доведено, що сучасні методи розрахунку не враховують деякі параметри а саме:

- ✓ характерної структури закрученого потоку;
- ✓ згасання інтенсивності закрутки по мірі віддалення потоку від завихрювача;
- ✓ зміни густини газу у радіальному напрямку під впливом відцентрових масових сил;
- ✓ зміни розподілу дисперсних часток за розмірами після проходження аеродисперсної системи завихрювачів;

- запропоновано розглядати, при розрахунках та дослідженнях, пилоочисний пристрій як комплекс;

- доказано, що запропонована конструкція найбільш повно відображає особливості процесу «сухого» очищення пилогазового потоку;

- отримано рівняння, яке попередньо дозволяє оцінювати тангенційну складову швидкості обертання аеродисперсної системи в циклоні;

- доведено, що тангенційна складова швидкості обертання аеродисперсної системи у вихровому апараті змінюється в залежності від інтенсивності вихору і його затухання.

Завдяки дослідженню динаміки потоку можливо підвищити ступінь очистки потоку, вдосконалити конструкцію пилоочисного обладнання.

**Ключові слова:** аеродисперсний потік, вихрова камера, циклонний апарат, методи очищення від пилу.

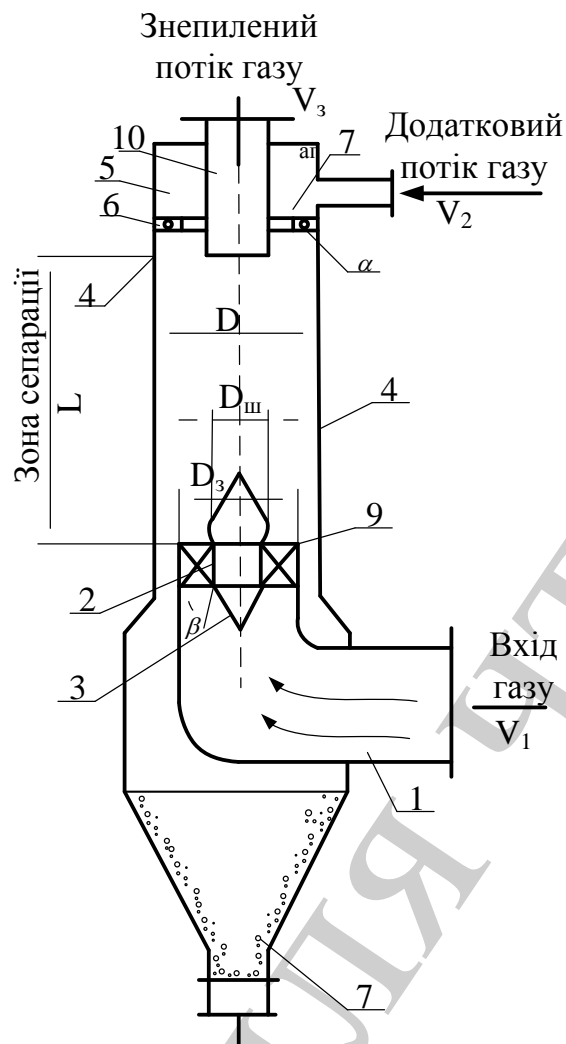
## **1. Вступ**

Сучасний екологічний стан України, обумовлений надмірною концентрацією небезпечних виробництв, застарілим та неефективним природоохоронним обладнанням, яке встановлюється на завершальних стадіях технологічних ліній, що виготовляють різноманітну продукцію. Невисока надійність природоохоронного обладнання і його низька ефективність функціонування на підприємствах підвищеного екологічного ризику визначає крайню актуальність постійної уваги до діяльності, що забезпечує екологічну безпеку країни. Наприклад, згідно з [1], кількість речовин, що викидається у повітря у вигляді пилу дорівнює 380–400 тис. т на рік, що складає біля 15–20 % від усіх небезпечних речовин, що викидаються в атмосферу. Крім цього в залежності від попереднього технологічного циклу (вироблення, переробки) в газах, що викидаються в атмосферу присутні токсичні газові домішки. Ці домішки знаходяться у вигляді:  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  та інші, а газопиловий потік може мати досить високу температуру, яка в деяких виробничих процесах може сягати 900 К. Все вищезазначене підвищує екологічну небезпеку. Тому однією з найактуальніших проблем, яка постає сьогодні перед промисловістю, є вдосконалення технологій та техніки охорони навколишнього середовища в цілому, і зокрема, зменшення запиленості атмосферного повітря.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

Об'єктом дослідження є циклонні та вихрові камери. Пиловловлювачі у виді циклонів та вихрових камер є перспективними для дослідження процесу та удосконалення їх конструкцій. Саме в цих апаратах реалізуються закручені вихрові потоки. Завдяки дослідженню динаміки потоку можливо підвищити ступінь очистки потоку, вдосконалити конструкцію пилоочисного обладнання.

Типовою конструкцією сухого пиловловлювача є вихровий пиловловлювач з циліндричною сепараційною камерою (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема вихрового пиловловлювача із зосередженим лопатевим введенням газу

На рис. 1 у газохід 1 надходить запилений газ і закручується лопатевим завихрювачем 2. Обтічник 3 трохи відтісняє потік до стінки апарата і сприяє плавному обтіканню газовим потоком втулки лопатевого завихрювача. Під дією відцентрової сили частинки в закрученому газовому потоці переміщуються до стінок корпусу 4. Одночасно той же запилений або очищений газ подається в роздавальну камеру 5 і за допомогою завихрювача 6, який виконано у вигляді сопел (6 шт.) з нахилом  $45^\circ$ , надходить у робочу порожнину апарата. Додатковий газовий потік, що виходить із завихрювача 6 підкреслює основний потік у ту ж сторону, що й завихрював 2 та одночасно здуває частинки пилу зі стінок у бункер 7. Додатковий потік газу у ході спірального обтікання основного потоку, поступово повністю проникає в нього. Кільцевий простір навколо вхідного патрубку може бути оснащений пиловідбійною шайбою 9, яка призначена забезпечити безповоротний спуск пилу до вивантажувального пристрою (транспортеру). З бункера пил надходить до ємкості готової продукції, а очищений газ через вихлопний патрубок 10 в атмосферу.

Переваги використання вихрових апаратів: робота з пилогазовими сумішами, які мають високу температуру, апарати мають досить високий ступінь очищення; можливість регулювання процесу очищення газу від пилу за рахунок регулювання витрати вторинного повітря.

Серед недоліків циклонів та вихрових пиловловлювачів слід виділити: високий гідравлічний опір, складну експлуатацію і установку, необхідність в потужному тягодуттєвому пристрої.

### **3. Мета і задачі дослідження**

*Мета роботи* – аналіз основних конструкцій апаратів для сухого очищення газопилових потоків, в яких реалізуються закручені потоки, і стану теоретичного опису особливостей процесу.

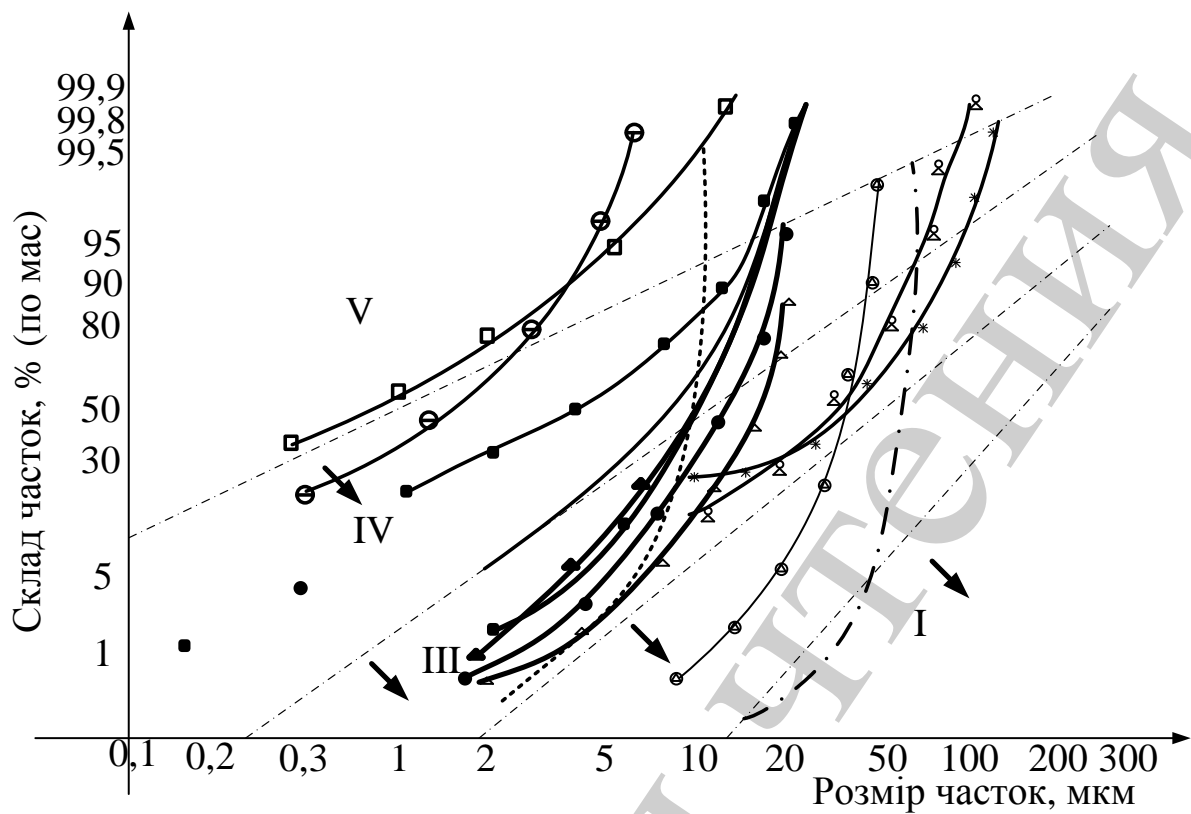
Для досягнення вказаної мети необхідно:

1. Довести, що сучасні методи розрахунку не враховують деякі параметри.
2. Запропонувати для розгляду, при розрахунках та дослідженнях, пилоочисний пристрій як комплекс.
3. Отримати рівняння, яке попередньо дозволить оцінювати тангенційну складову швидкості обертання аеродисперсної системи.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Промислові газові викиди представляють собою аеродисперсну систему, в якій частинки пилу (твердої фази) є дисперсною фазою, а газ – суцільною. Підприємства хімічної, переробної чи будь-якої іншої галузі промисловості є виробництвами зі складними технологічними процесами та технологічними комплексами. В цих виробництвах можуть використовуватися термічні, механічні або хімічні процеси, що супроводжуються утворенням чи виділенням газових потоків, які містять в собі частинки твердої фази [2, 3].

В роботах [4–7] наведені дані щодо характеристики аеродисперсних систем, які подаються на очисні споруди для очищення газового потоку від пилу на деяких виробництвах, або технологічних схемах виготовлення продукції. Результати аналізу наведених даних представлені на рис. 2, та в табл. 1, 2.



**Рис. 2.** Класифікаційна номограма для визначення групи пилу

**Таблиця 1**

Характеристика деяких аеродисперсних систем за результатами обстеження (усереднені показники)

Характеристика газопилового потоку, що надається для очищення												
№	Кількість газів, що подається на очищення, $\text{м}^3/\text{год}$	Суцільна частина									Дисперсна частина	
		$\text{CO}_2$ , %	$\text{H}_2\text{O}$ , %	$\text{N}_2$ , %	$\text{O}_2$ , %	$\text{CO}$ , $\text{мг}/\text{м}^3$	$\text{NO}_x$ , $\text{мг}/\text{м}^3$	$\text{SO}_x$ , $\text{мг}/\text{м}^3$	Густина, $\text{г}/\text{см}^3$	В'язкість, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot 10^{-6}$ (* – Па·с)	Тип	Концентрація, $\text{г}/\text{м}^3$
1	1000	30–32	10–12	54–55	1–2	0,05	–	–	1,07	2,45	MgO	20
2	1500–3000	15–17	–	65–75	10–12	100–200	70–80	50–80	1,21	2,45	ZnO	5–6
3	15600	26–28	15–16	56–58	1,1–1,3	0,05	50	–	1,2	2,45	CaO+CaCO <sub>3</sub>	6–7
4	3000–4000	–	93–94	3–6	1–3	–	–	–	1,19	147*	Ca(OH) <sub>2</sub>	15–20
5	3000	92–93	5–6	1,0–1,1	1,1–1,2	–	–	–	1,25	97*	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	90–500

Таблиця 2

## Фізико-хімічні властивості твердих частинок

№	Температура потоку, °С	Фізико хімічні властивості		
		Густина, г/см <sup>3</sup>	Інтервал розміру частинок, м/см	Питома поверхня, м <sup>2</sup> /г
1	400	3,58	0,5–5,0	10,0
2	520–550	5,70	0,3–5,0	8,0
3	230–270	2,93	5,0–10,0	1,5–2,0
4	120–150	2,24	1,0–6,0	15,0–20,0
5	120–150	2,16	2,0–10,0	1,0–3,0

Як свідчать наведені результати суцільна частина аеродисперсної системи за своїм складом в більшості представляє собою газ близький до навколишнього повітря. В деяких технологічних процесах основним компонентом суцільної частини є водяна пара, діоксин вуглецю, їх суміші, або можливо інший газ в залежності від типу технологічного процесу. Основними параметрами, що характеризують суцільну частинку є витрати газу і відповідно швидкість його подачі на очищення в очисний апарат, а також температура, густина, в'язкість, які мають вплив на гідродинаміку в апараті очищення.

Дисперсна частинка, як свідчать наведені дані, представляє різноманітні тверді частинки як правило округлої форми, концентрація яких в суцільній фазі коливається від 3–5 до 90–500 г/нм<sup>3</sup>. В більшості випадків, як свідчать літературні джерела [4–7], концентрація дисперсної частинки в газових потоках коливається в інтервалі 3–10 г/нм<sup>3</sup>. Визначальними параметрами, що характеризують дисперсну фазу, є густина, розмір частинок, питома поверхня, злипаємість. Останній параметр певно повинен корелюватися з величиною питомої поверхні і кута природного відкошу матеріалу. Наприклад, встановлено [6], що злипаємість частинок ZnO, Ca(OH)<sub>2</sub>, які мають питому поверхню близько 10–15 м<sup>2</sup>/г складає (500–600 Па), а кут природного відтоку (статичний) 70–80°. При зменшенні питомої поверхні до 1 м<sup>2</sup>/г показник злипаємість збільшується в 6–8 разів, а кут відкошу у 1,5–2,0 рази зменшується. В цілому аеродисперсна система до входу в апарат-пиловловлювач може рухатися в трубах або каналах з любым типом перетину каналу, його кривизні та довжини. Вірогідно ця ділянка трубопроводу можна характеризувати як вхідний патрубок в апарат-пиловловлювач і в ньому повинно спостерігатися повністю розвинута турбулентна течія, припускаючи рух вісесеметричним [8].

В трубі формується течія з повністю замкнутим пограничним шаром. Профілі осереднених швидкостей в любому перетині залежать від числа Re або ступеня турбулентності потоку. Дослідженнями встановлено, що присутність дисперсної фази в аеродисперсній системі в кількості до 100 г/нм<sup>3</sup>, змінюючи рівень швидкості, не впливає на характер їх розподілу [9, 10] порівняно з суцільною фазою без аерозолі.

Крім вищевказаного, поступового руху аеродисперсної системи вдовж вісі патрубка, в ньому можливо виникнення відривної течії потоку з виникненням

вихорів, тобто може виникнути вісесиметричний обертаємий потік з виникненням вихрового шнура [11].

Таким чином, при русі аеродинамічної системи в патрубках перед входом в апарат-пилословлювач може спостерігатися інтенсивна перебудова полів всіх газодинамічних параметрів, у тому числі виразно спостерігатися ефект перерозподілу повної енергії у потоці.

Тому вищевказані фізико-хімічні показники дисперсної частини аеродинамічної системи при русі останньої в патрубках перед вводом у пилословлювач можуть впливати на процеси агломерації твердих частинок. Також це може впливати на можливість протікання хімічної деструкції газових домішок та розподіл твердої фази по перетину патрубка. Ці показники впливають на процес в залежності від руху системи, її температури, ефекту повного перерозподілу енергії потоку.

## **5. Методи досліджень**

Методи, що застосовуються для очищення аеродисперсних систем від пилу, туману та шкідливих домішок, і необхідна ефективність очищення визначаються в першу чергу санітарними і технологічними вимогами. Також вони залежать від фізико-хімічних властивостей самих домішок, а також від складу та активності реагентів, від конструктивного рішення пристроїв, які застосовуються для очищення. У зв'язку з цим застосовують різні технології та методи очищення.

Однією з основних характеристик, що визначає вибір типу обладнання для очищення газових потоків є розмір частинок дисперсної фази. Крупні частинки досить легко відділяти від суцільної газової фази і для цього може бути використаний апарат найпростішого типу. Але якщо частинки дрібні, то це може вимагати використання або складних апаратів, або й кількох з таких апаратів, що установлені послідовно. Також від діаметру частинок аеродисперсної системи залежать такі характеристики, як: коефіцієнт дифузії, величина поверхні частинок, ширина лінії рентгенівського спектру та інше. Але сучасні методи аналізу дисперсного складу газопилових сумішей не дозволяють визначати масу або число частинок одного розміру. У результаті таких аналізів зазвичай визначають виходи фракцій, які виражають в долях або процентах від загальної маси або загальної кількості частинок. Крім цього визначають ще сумарні виходи, тобто дисперсний склад аеродисперсної системи в більшості випадків визначається функцією щільності розподілу частинок в потоці газу.

Коли газопилова суміш рухається трубопроводами чи технологічними лініями, то на дисперсні частинки діють різні сили. Рух частинок може бути прямолінійним, при цьому частинка може прискорюватися або уповільнюватися, чи криволінійним, тобто під дією сил, що можуть змінити початковий напрям руху частинки.

При криволінійному русі аеродинамічної системи на частинки починає діяти сила інерції, яка збільшує швидкість руху дисперсної фази. При цьому частинки переміщуються від осі руху, а різка зміна напрямку руху, перед якимось предметом або в криволінійному каналі, може призвести до зіткнення

частинок з такими предметами чи стінкою каналу. Отже, це ті основні механізми, які використовуються при проектуванні газоочисного сепараційного обладнання. При русі тіла в газі воно завжди відчуває опір з боку середовища, тобто прискорюється під дією його руху. При чому сили опору залежать як від властивостей середовища (густини, в'язкості), так і від швидкості тіла. По виду основної масової сили, що діє на дисперсні частинки при розділенні в газовому потоці, сухі пиловловлювачі відносяться до так званих механічних пиловловлювачів. Вони представляють собою пиловідстійні або пилоосаджувальні камери, інерційні апарати, циклони та мультициклони, ротоклони, вихрові камери. Застосування в технологічних лініях хімічних, переробних виробництв такого обладнання для сухого очищення газу від пилу характеризується низьким ступенем розділення, що забезпечує грубе очищення газопилових сумішей.

Незважаючи на останнє, пиловловлювачі у виді циклонів та вихрових камер (апаратів) вважаються перспективними для дослідження процесу в них та удосконалення їх конструкцій тому, що в них реалізуються закручені циклони, вихрові потоки. Досліджуючи динаміку потоку і теплові задачі при цьому, можливо підвищити ступінь очищення пилогазового потоку, а також удосконалити конструкцію пиловловлювача.

Але незважаючи на широке використання циклонів і вихрових камер, в галузі відцентрованого уловлення твердих частинок з газових потоків відзначають наступне. Теорія функціонування цих апаратів ще не вдосконалена і не дає можливості розраховувати апарати різних конструкцій, а крім того удосконалювати сам технологічний процес.

Процеси сухого очищення технологічних бросових газів є досить складними процесами і в багатьох випадках нестационарними. Для того, щоб проектувати та ефективно оперувати системами сухого очищення газів від пилу необхідні відповідні математичні моделі. Ці моделі повинні враховувати не тільки гідродинамічні умови, але й зміну фізико-хімічних властивостей частинок пилу та їх розмір при протіканні процесу.

## **6. Результати дослідження**

Теорія фізико-хімічного агрегування частинок змінної маси [12, 13] у подібних гідродинамічних умовах дає обґрунтування процесу агломерації. Основним механізмом даного процесу є зіткнення частинок, виникнення дефектних зон в місті контакту частинок при зіткненні, утворення кристалічних «містків» між частинками в агломератах. Вірогідність зіткнення частинок залежить від  $Re$ , тобто від діаметру патрубків і масової витрати аеродисперсної системи. В роботах [14, 15] для аеродисперсних систем (табл. 2, 3) експериментально доведено протікання процесу агломерації в патрубках перед вводом системи в пиловловлювач. Показано, що наприклад частинки  $(CaO+CaCO_3)$  формуються в агломерати з величиною 35–40 мкм, при цьому на вході в патрубок частинки твердої фази мали розмір 5–10 мкм. Аналогічне явище спостерігалось і в системі 2, де частинки  $ZnO$  збільшувалися від 8–10 до



45–60 мкм. Таке явище пов'язано з процесом агломерації та спостерігалось авторами патенту [16] при виготовленні високодисперсного  $\text{TiO}_2$  шляхом окиснення  $\text{TiCl}_4$  при температурі 1000 °С. Враховуючи досить високі температури аеродисперсних систем (2, 3), що рухаються в патрубку в роботах [17, 18], були проведені термодинамічні розрахунки та досліджені кінетичні закономірності можливості деструкції газових домішок у суцільній фазі. Встановлено, що в присутності парів  $\text{H}_2\text{O}$  в кількості відповідної стехіометричному відношенню до маси домішок протікає деструкція домішок, наприклад по типу:



При температурі 400–500 °С, а  $\text{NO}_x$  та  $\text{SO}_x$ , при менш високих температурах – 280–350 °С. Тобто можливо протікає гомогенний каталіз, інтенсивність і швидкість якого повністю визначається умовами переносу в потоці речовини та енергії:

$$Pa = f(Re; Pr_T; Pr_D),\tag{2}$$

де  $Pa$  – критерій рівноваги;

$Re$  – критерій Рейнольдса аеродисперсної системи;

$Pr_T$  – критерій Прантля, для теплового обміну:

$$Pr_T = \gamma/a,$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;

$\gamma$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;

$Pr_D$  – Критерій Прантля для матеріального обміну:

$$Pr_D = \gamma/D_c,$$

де  $D_c$  – коефіцієнт дифузії газових домішок.

Таким чином, вхідний патрубок і процеси, що спостерігаються в середині нього, при проходженні аеродисперсної системи перед входом у основний апарат необхідно розглядати, як попередню підготовку аеродисперсної системи перед її обробкою у основному апараті. Гідродинамічні режими у вхідному патрубку та параметри турбулентного, вихрового руху аеродисперсної системи описуються рівнянням Нав'є-Стокса при відповідних початкових та граничних умовах. Як відмічалось, основними апаратами-пиловловлювачами є циклони та вихрові камери [19].

При аналізі траєкторії руху частинок пилу можна зробити висновок, що в загальному вигляді процес очищення повітря в запропонованих апаратах відбувається наступним чином. Пилоповітряна суміш тангенціально поступає в

корпус апарата через вхідний патрубок і продовжує свій рух зверху вниз до пиловипускного патрубку, не змінюючи напрямку свого руху. На вхіді в апарат така суміш рухається прямолінійно, запыленість газового потоку по розрізу апарата залишається практично рівномірною та швидкість руху частинок пилу дорівнює швидкості входу газового потоку в апарат. Після входу в апарат під дією відцентрової сили тверді частинки відкидаються до зовнішньої його стінки, концентрації яких в периферійній зоні корпусу перешкоджає явище рикошетування частинок в результаті їх стикання зі стінкою. У наслідок цього, при значній швидкості потоку збільшується початкова швидкість обертання частинки, її підйомна сила та величина її радіального переміщення під впливом цієї сили. При цьому рух окремих відбитих від стінки частинок амортизується частинками, які рухаються до стінки, і це відбувається в усьому потоці.

Тверді частини пилу, захоплені радіальною течією потоку, ударяються в жалюзі відокремлювача, відбиваються від них, підхоплюються рухомим потоком, ударяються в наступні жалюзі і т. п. Це відбувається доти, аж доки не потраплять у потік, який рухається вздовж зовнішньої стінки і транспортує їх до виходу з апарату в бункер. Очищений таким чином пилоповітряний потік проходить через отвори між жалюзі, а частинки пилу в бункер.

Початковими умовами для таких апаратів є характеристика аеродисперсної системи після вхідного патрубку. Граничні умови: рівність нулю швидкості на нерухомій твердій границі; швидкість пилоповітряного потоку на вході в пиловловлювач – стабільна та дорівнює 20–25 м/с [19].

Для цього випадку при допущенні, що  $\mu = \text{const}$ , рівняння Нав'є-Стокса записується у вигляді [19]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_x}{d\tau} &= x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \nu \Delta V_x + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \cdot \text{div} \overline{V_x}, \\ \frac{dV_y}{d\tau} &= y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \nu \Delta V_y + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \cdot \text{div} \overline{V_y}, \\ \frac{dV_z}{d\tau} &= z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} + \nu \Delta V_z + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial z} \cdot \text{div} \overline{V_z}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для матеріального опису турбулентного масопереносу доцільно використати  $k-\epsilon$  модель турбулентності, значення яких визначається з наступних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dk}{d\tau} + \bar{V}(Vk) &= \frac{1}{\rho} \cdot \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right] + \frac{G}{\rho} - \varepsilon, \\ \frac{d\varepsilon}{d\tau} + \nabla(V\varepsilon) &= \frac{1}{\rho} \cdot \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left( C_1 \cdot \frac{G}{\rho} - C_2 \cdot \varepsilon \right), \\ G &= \mu_T \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де  $V_x, V_y, V_z$  – швидкості по відповідним напрямкам, м/с;  $x, y, z$  – безрозмірні координати;  $k$  – турбулентна енергія,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu_T$  – динамічна в'язкість,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

На частину пилу під час її руху у закрученому потоці при вищезначених умовах діють: сили тяжіння  $\bar{F}_T$ , відцентрована сила  $\bar{F}_\Omega$ , та сила опору середовища (сила Стокса)  $\bar{F}_C$ .

$\bar{F}_C$  визначається за формулою:

$$\bar{F}_C = 3\pi\mu_T d \bar{V}_c X, \quad (5)$$

де  $\bar{V}_c$  – швидкість осадження частинки, м/с;  $X$  – динамічний коефіцієнт форми частинки пилу – 2,9;  $\bar{F}_C$  – дорівнює сумі зовнішніх сил та направлена у зворотньому напрямі та розраховується за формулою:

$$\bar{F}_C = \bar{F}_T + \bar{F}_\Omega, \quad (6)$$

де  $\bar{F}_\Omega$  – відцентрована сила, що дорівнює:

$$\bar{F}_\Omega = m_c \cdot \frac{\bar{V}_{\Gamma T}^2}{R} = \frac{\pi d_c^2}{6} (\rho_c - \rho_\Gamma) \frac{\bar{V}_{\Gamma T}^2}{R}, \quad (7)$$

де  $m_c$  – маса частинки,  $\text{кг}$ ;  $\rho_c$  – густина частинок пилу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_\Gamma$  – густина суцільної частинки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Таким чином, можна стверджувати, що  $V_c$  в основному залежить від  $\bar{F}_\Omega$ , тобто сили, яку визначає тангенціальна складова швидкості ( $\bar{V}_{\Gamma T}$ ) обертання аеродисперсної системи в апараті. Останнє значення  $\bar{V}_{\Gamma T}$  залежить від способу вводу аеродисперсної системи після патрубку в апарат циклону, тобто від способу закрутки вхідного потоку. Закрутка вхідного потоку у циклоні може здійснюватися різними способами. Як вже відмічалось, шляхом тангенціального вводу всього потоку аеродисперсної системи, або потік розділяється на декілька частин і кожна частина вводиться тангенціально під

різними кутами [20]. Інший шлях закрутки потоку – встановлення гвинтоподібної кришки за патрубком вводу, яка інтенсивно закручує потік [21]. Шляхом встановлення ротора з частотою обертання  $4300 \text{ хв}^{-1}$ , який по тороподібному каналу розганяє аеродисперсну систему і тангенціально подає потік в циклон [22]. Шляхом встановлення равликового завіхрювача [20] та інше.

Більшість відомих у даний час схем та методів аеродинамічного розрахунку циклонних та вихрових пристроїв, наприклад [23–25], передбачають незалежність розподілу тангенціальної складової швидкості потоку від продольної координати. Спроби числового аналізу закрученого потоку у привісьовій області на основі загальних рівнянь руху [26, 27] не підтверджують експериментально суттєву деформацію профілю  $\omega_\omega$ . В літературних джерелах найбільш часто  $\bar{V}_{\Gamma\Gamma}$  виражається як  $\omega_\omega$ , тому далі теж перейдемо до цього відтворення. Особливо це відбувається в залежності від розміру патрубка виходу з циклону очищеного потоку, і пов'язану в основному з впливом вісівої зворотної течії. Крім того в багатьох випадках це пов'язано також з тим, що не досить в повній мірі враховані особливості течії потоку в зонах, що аналізуються, особливо в зонах вводу потоку. Аналіз експериментальних розподілів  $\omega_\omega$  по радіусу і зонам [23–27] доводить, що з початку при вводі потоку в циклон спостерігається зона «квазітвердого» обертання. Потім спостерігається «квазіпотенційна» зона, в якій і реалізується основний процес розділення аеродисперсної системи на дисперсну частину та суцільну. При цьому,  $\omega_{\omega\max}$  досягається на деякій відстані за зоною «квазітвердого» обертання. Можна стверджувати, що значення  $\omega_{\omega\max}$  та його положення однозначно залежить від способу закрутки вихрового потоку і конфігурації кільцевого каналу, який утворюється між корпусом апарату (циклону) та патрубком відводу очищеного газу. Для розрахунку  $\omega_\omega$  у привісьовій області, виходячи з умов існування максимуму кутової швидкості  $\omega_x$  ( $x$  – координати вздовж кільцевого каналу), який досягається на радіусі:

$$0 \leq \eta_\omega \leq 1,$$

де  $\eta_\omega$  – безрозмірний радіус, який дорівнює:

$$(r - r_3) / (r_{\omega\max} - r_3),$$

де  $r = D_\omega / 2$ , м;  $r_3 = D_\Pi / 2$ , м;  $D_\omega$  – діаметр камери апарату, м;  $D_\Pi$  – діаметр патрубка відводу газу, м.

При цих умовах можна використати рівняння, яке описує умови сталості руху газу, що обертається [28] у привісьовій області циклонного потоку. Радіус  $\eta_\omega$  буде границею зон з консервативним ( $0 \leq \eta \leq \eta_\omega$ ) та активним ( $\eta > \eta_\omega$ ) характером дії інерційних масових сил на течію:

$$\frac{\partial \bar{\omega}_x}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \frac{1}{\eta} \cdot \left( \frac{2\eta}{1+\eta^x} \right) \right] = 0, \quad (8)$$

$$\eta = \eta_\omega = \frac{1 + \eta_\omega^x}{1 - (x-1)\eta_\omega^x}, \quad (9)$$

де  $x$  рекомендовано в інтервалі значень 1,87–2,0.

Аналітичний зв'язок  $\eta_\omega$  з основними геометричними параметрами циклонної камери і прокільною координатою ( $x$ ) можна здобути, використовуючи гвинтову модель течії газу у привісній області. Для цього запишемо вектори рівняння осередненого руху в'язкого нестискаємого потоку у формі Гельм-Гольца, тобто у формі переносу завихренності [29]:

$$\frac{\partial \langle \omega \rangle}{\partial \tau} = \nabla x (\langle v \rangle \cdot \langle \omega \rangle) + \nabla x (v' \cdot \omega') + v \cdot \nabla^2 \langle \omega \rangle. \quad (10)$$

Для стаціонарної гвинтової течії:

$$\frac{\partial \langle \omega \rangle}{\partial \tau} = 0; \quad \langle v \rangle \cdot \langle \omega \rangle = 0,$$

де  $\omega$  – кутова швидкість потоку;  $v$  – повна лінійна швидкість потоку.

Враховуючи зв'язок пульсаційної та осередненої складової кутової швидкості  $\omega' = L \frac{\partial \langle \omega \rangle}{\partial r}$  ( $L$  – масштаб турбулентності), по теорії переносу завихренності Тейлора, та при  $r=r_\omega$ , маємо:

$$\omega'_m = 0 \text{ та } (v'_x \cdot \omega')_m = 0. \quad (11)$$

Штрих означає пульсації, а не значення. Тому рівняння (10) записане відносно  $\bar{\omega}_{xm}$  (символи осереднення опускаємо) і представлене у безрозмірному вигляді спрощується та переходить до еліптичного виду:

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}_{xm}}{\partial \eta_3^2} + \frac{1}{\eta_3} \cdot \frac{\partial \bar{\omega}_{xm}}{\partial \eta_3} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}_{xm}}{\partial x^2} = 0. \quad (12)$$

Використовуючи співвідношення (9) знаходимо:

$$\bar{\omega}_{xm} = \frac{1}{\eta_\omega} \left( \frac{2\eta_\omega}{1+\eta_\omega^x} \right)^{\frac{1+\eta_\omega^x}{1-(x-1)\eta_\omega^x}} \geq \frac{2}{1+\eta_\omega}. \quad (13)$$

Похибка заміни на останнє співвідношення не перевищує 4 %. Враховуючи незалежності перемінних  $\eta_3$  та  $x$  загальне рішення (12) відносно  $\eta_\omega$  можна отримати за рахунок зрощування рівнянь  $[\eta_\omega = \eta_\omega(\bar{x})]$ ;  $\eta_3=0$ ;  $\eta_\omega = \eta_\omega(\eta_3)$ ;  $\frac{\partial \eta_\omega}{\partial x} = 0$ , з урахуванням граничних умов задачі, які враховують закон закрутки вхідного потоку. В результаті можна отримати наступний розрахунковий вираз:

$$\eta_{\omega,x} = \frac{2}{1 + Kx \cdot Ln \cdot \eta_3}, \quad (14)$$

де  $Kx = \frac{1}{5} \left\{ 1 - 2 \left[ \left( 1 - \frac{X - X_H}{1 - X_H} \right) \left( \frac{1 - X_H}{1 + \eta_p} + \frac{X}{1 - X_H} \right) \right] \right\}$ ;

$X = \frac{\bar{x}}{x_{np}}$  – безрозмірна прокольна координата;

$\bar{x} = \frac{x}{r_m}$  – безрозмірний текучий радіус;

$\eta_p$  – безрозмірний радіус нульового значення збиткового статичного тиску.

При значенні  $K_x = K_{np} = const$  спостерігається автомодельний розподіл  $\bar{W} = \bar{W}(\eta)$  по координаті  $X$ . Очевидно, що в циклонних камерах з різними способами закрутки вхідного потоку і різними конструктивними характеристиками вихідного патрубка очищеного газу, граничні умови будуть формуватися по-різному і можливо будуть більш складні. Останні умови будуть впливати на показник  $K_x$  в рівнянні (14). Рівняння (13) з досить невеликою помилкою може бути використано для розрахунку та прогнозу  $\bar{\omega}_{xm}$  по довжині циклонної камери і відповідно для визначення  $\bar{F}_c$  і  $V_c$ . Таким чином, наведені моделі рівняння (8)–(14) дозволяють попередньо оцінювати тангенціальну складову швидкості  $W_\varphi$  обертання аеродисперсної системи в циклоні по продольній координаті. Це відкриває можливість зміни конструктивного профілю зони осадження пилу і співвідношення цієї зони з бункерною частиною з метою забезпечення підвищення ефективності пиловловлювача.

Як відомо [29], закручений газовий потік після завихрювача є складним тримірним. Вектор швидкості потоку розкладається в циліндричній системі координат на три складові: осьову, тангенціальну (обертальну) і радіальну. Наявність обертальної складової саме і приводить до виникнення в потоці відцентрованих сил і утворенню радіального градієнту статичного тиску. Для виконання проектних розрахунків необхідно знати кутову швидкість обертання потоку  $\omega_1(z)$  у довільному перерізі сепараційної камери на певній висоті ( $z$ ) у

внутрішньому шарі. Рівняння моменту кількості руху газу визначається залежністю [30]:

$$M_1(z) = \int_0^{r_x} \rho \cdot V_{s1} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \cdot \omega_1(L) \cdot r^2. \quad (15)$$

Після інтегрування та відповідних перетворень здобуто рівняння для визначення кутової швидкості обертання потоку в сепараційній камері матиме такий вигляд:

$$\omega(z) = \frac{2M_{ex} \cdot r_x^2}{\rho \cdot (L_1 + L_2) \cdot r^4}, \quad (16)$$

де  $L_1$  та  $L_2$  – витрати первинного та вторинного потоків,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$ ,  $z$  – висота сепарації та відстань до перерізу, що розглядається,  $\text{м}$ ;

$$L_1(z) = L_1 + L_2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z}{H} \right)^{k-1} \right]; \quad L_2(z) = L_2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right];$$

$$M_{ex} = 0,5\pi \cdot \rho \cdot V_z \cdot V_\varphi \cdot r_0,$$

де  $k$  – емпіричний коефіцієнт (при  $k=0$  радіальна швидкість розподіляється так як описано в теорії [30]; при  $k \geq 0$  радіальна швидкість наростає до низу камери; при  $k \leq 0$  радіальна швидкість зменшується до низу камери);

$r_0$ ,  $r_x$ ,  $r$  – радіус: сепараційної камери, розділення потоків, поточний відповідно,  $\text{м}$ ;

$V_z$ ,  $V_\varphi$ ,  $V_r$  – осьова, тангенціальна, радіальна швидкості руху потоків,  $\text{м/с}$ .

При цьому треба відзначити, що в формулі для визначення  $M_{ex}$  швидкість  $V_\varphi$  відповідає тангенціальній складовій обертаємого потоку, яка спостерігається зразу за завихрювачем у патрубку подачі газу в перетині близько до нього. Таким чином при інших рівних умовах значення  $\omega(z)$  залежить від складової  $V_\varphi$ , яка однозначно залежить від гідродинамічних умов у патрубку подачі газу в зоні завихрювача і зразу після нього.

Двофазний потік в моделі пиловловлювача можна розглядати при прийнятті наступних припущень:

- частинки пилу є твердими, можуть взаємодіяти між собою за рахунок інтенсивного зіткнення та розвинутої питомої поверхні частинок тільки в зоні завихрювача. Саме тут спостерігаються максимальні значення  $V_\varphi$ ,  $V_r$  та присутнє квазітверде обертання пило газового потоку;

- після області (зони) завихрювача частинки не взаємодіють між собою;

- частинка, що торкнулася до стінки корпусу камери апарату, вважається вловленою;

– на вході в пиловловлювач потік пилогазового потоку має рівномірне поле швидкостей;

– розподіл частинок пилу по перерізу вхідного патрубку пиловловлювача є рівномірним, опір руху частинок у газовому середовищі описується законом Стокса;

– тангенційна складова швидкості частинки співпадає з тангенційною і вісьовою складовими швидкості обертання газового потоку, радіальні швидкості у наслідок дії сил інерції є різними.

При цьому виділяються два безрозмірних параметра задачі: ступінь початкової закрутки потоку:

$$\eta = V\varphi_0 / V_{z0},$$

де  $V\varphi_0$  – характерна тангенціальна швидкість на виході з завихрювача ( $V\varphi_0 \geq 0$ ), при цьому в ядрі потоку, що виходить з завихрювача  $\omega = V\varphi_0$  ступінь засмічення каналу  $\Psi = \frac{D_{BT}}{D}$ .

Таким чином, вихрова течія в патрубку подачі газу після завихрювача може бути охарактеризована поняттям інтенсивність вихору. Найбільш точним виразом для нього є:

$$m = \frac{B}{FR} = \frac{2\pi \cdot \rho \int_0^R V\varphi \cdot V_z \cdot r^2 \cdot dr}{\left( 2\pi \cdot \rho \int_0^R V_z^2 \cdot r^2 \cdot dr \right) \cdot R}, \quad (17)$$

де  $B$  – потік обертаємого моменту кількості руху;

$F$  – потік аксіального імпульсу;

$R$  – радіус патрубка;

$\rho$  – густина газу;

$V_z$  – аксіальна складова швидкості;

$V\varphi$  – тангенціальна складова швидкості;

$r$  – текуча координата по радіусу патрубка.

Аналіз гідродинамічних умов у такому вихровому апараті дає зробити висновки. Максимальна кутова швидкість обертання потоку в сепараційній камері апарата залежить від гідродинамічних процесів, що протікають у патрубку подачі аеродисперсної системи в сепараційний простір апарата. Тангенційна складова швидкості обертання потоку у патрубку подачі аеродисперсної системи визначає інтенсивність обертання потоку в сепараційній камері, а відповідно і сили, що діють на частинку пилу і швидкість її осадження. Відміною в порівнянні з циклонним апаратом є те, що закрутка потоку у патрубка подачі вихрового апарата здійснюється за рахунок установки лопатевих або кільцевих завихрювачів з тангенційними прорізами (соплами).



Вони можуть бути виконані теж під різними кутами. В літературних джерелах, де наведені результати досліджень гідродинамічних структур при русі конкретної аеродисперсної системи, при закрутці потоку в патрубках її подачі в сепараційну частину вихрового апарату – практично відсутні. Це суттєво важливо, коли виникають питання: місце установки завихрювача від торцевого виходу патрубка, вплив кутів нахилу лопатей або сопел, а також ступені засмічення каналу. Базуючись на аналізі літературних джерел, можна прогнозувати наступне. У патрубку вводу аеродисперсної системи в сепараційну камеру вихрового апарату при відповідних умовах можна досягати ефектів зміни аеродисперсної системи за рахунок коагуляції, деструкції газових домішок та інше. Тобто, у вихровому апараті патрубок вводу аеродисперсної системи в сепараційну зону виглядає, як підготовча система, яка визначає умови осадження пилу в сепараційній зоні.

При виборі або аналізі функціонування пиловловлювачів, в яких реалізуються закручені потоки аеродисперсної системи необхідно розглядати комплекс пристроїв:

- патрубок вводу аеродисперсної системи в апарат;

- інтенсивність та спосіб закрутки потоку при його вводиті в сепараційну частинку. Бункерну систему з виводом до неї осадженого пилу. З точки зору тільки такий комплексний підхід може вказати шляхи дійсно суттєвого підвищення ефективності процесу сухого очищення аеродисперсної системи.

При розробці методу розрахунку ступеня очищення аеродисперсної системи треба враховувати зміни вісьової та обертальної швидкості, густини і статичного тиску газу у радіальному та повздовжньому напрямках сепараційної камери. Також необхідно враховувати зміни розподілу частинок пилу за розмірами після проходження газодисперсного потоку. Можна запропонувати для одержання функцій, що описують поле осередненої швидкості вісесиметричного закрученого турбулентного потоку, такі залежності:

$$W = W_x \cdot \left[ \frac{2 \cdot \left( \frac{r}{r_\phi} \right)}{\left( 1 + \left( \frac{r}{r_\phi} \right)^2 \right)} \right]^J, \quad (18)$$

$$U = \frac{W \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^n}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (19)$$

де  $R$  – радіус каналу, в якому рухається закручений потік, м;

$n$  – показник ступеня закону зміни кута нахилу (атаки) завихрювача в залежності від радіуса каналу;

$\varphi$  – кут закрутки завихрювача на периферії, град;

$W_x$  – максимальне значення обертальної швидкості, м/с;

$j$  – показник ступеня, який залежить від початкового інтегрального параметра закрутки;

$r$  – радіус координати каналу, в якому рухається закручений потік, м;

$r_\varphi$  – радіус, на якому обертальна швидкість максимальна, м.

Враховуючи зміни закрученого потоку на всьому радіусі каналу і по мірі віддалення закрученого потоку від завихрювача  $L_x(r_k)=L$  ( $r_k$  – текучий радіус частинки) можна запропонувати рівняння (20):

$$L_x(r_k) = \int_{R_0}^R \frac{U(\Phi, r, x) \cdot r \cdot dx}{\sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{\rho_{TP} - \rho(P, r, x) \cdot \Phi(r, P, r, x)}{\rho_G(P, r, x) \cdot \xi(r_k, \mu_G, \Phi(r, P, r, x) \cdot \rho_T \cdot k \cdot W(\cdot, \cdot, \cdot))}} \cdot \frac{W(\cdot, \cdot, \cdot)^2}{r_k}},$$

де  $U(\Phi, r, x)$  – осьова складова, м/с;

$W(\Phi, r, x)$  – обертальна складова, м/с;

$\rho_G(P, r, x)$  – густина газу як функція статистичного тиску, радіуса та відносної продольної координати, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_T$  – густина частинок пилу, кг/м<sup>3</sup>;

$\xi(r_k, \mu_G, \Phi(r, P, r, x) \cdot \rho_T \cdot k \cdot W(\cdot, \cdot, \cdot))$  – коефіцієнт місцевого опору середовища, як функція радіусу частинок (коефіцієнти динамічної в'язкості газу, густини газу, твердих частинок, питомого вмісту частинок в газі, обертальна складова швидкості потоку).

Ступінь очистки газу в апаратах можна розраховувати за формулою:

$$\eta_{оч} = \frac{\int_{r_{min1}}^{r_{min2}} r_k^3 \cdot N(r_k) dr_k}{\int_{r_{min}}^{r_{min1}} r_k^3 \cdot N(r_k) dr_k}, \quad (21)$$

де  $r_{min1}$  – мінімальний радіус частинок пилу, що виділяються в осаджувальній секції сепаратора, м;  $r_{min}$  – мінімально можливий радіус частинок пилу у потоці, м;  $N(r_k)$  – функція розподілу частинок за розміром.

Урахування у формулі (21) зміни розподілу частинок пилу за розміром після проходження завихрювача відбувається на рівні визначення функцій  $N(r_k)$  через середній модальний радіус  $R_q$ . Цей показник, окрім інших чинників, залежить від еквівалентного діаметру каналу, в якому рухається потік. Тому для розрахунку  $N(r_k)$  необхідно використовувати найменше значення з  $R_{cp}(d_{ш})$  та  $R_{cp}(d_{экв})$ , де  $d_{ш}$  – внутрішній діаметр штуцера входу газу у сепаратор;  $d_{экв}$  – еквівалентний діаметр вільного перетину завихрювача.

Положення, представлені у формулах (18)–(21), базуються на аналізі розглянутих літературних джерел.

## **7. SWOT-аналіз результатів досліджень**

*Strengths.* Аналіз здобутих результатів досліджень процесу пиловловлення у вихрових апаратах свідчить про доцільність використання таких апаратів як високоефективних пиловловлювачів для сухого очищення газів. Завдяки дослідженню динаміки потоку можливо підвищити ступінь очистки потоку, вдосконалити конструкцію пилоочисного обладнання.

*Weaknesses.* В роботі були розглянуті методи знепилення газових потоків. Серед недоліків циклонів та вихрових пиловловлювачів слід виділити: високий гідравлічний опір, складну експлуатацію і установку, необхідність в потужному тягодуттєвому пристрої.

*Opportunities.* Відкриваються перспективи для впровадження вихрових труб і вихрових камер та можливість зниження промислового негативного впливу на атмосферу. Переваги використання вихрових апаратів: робота з пилогазовими сумішами, які мають високу температуру, апарати мають досить високий ступінь очищення; можливість регулювання процесу очищення газу від пилу за рахунок регулювання витрати вторинного повітря.

*Threats.* За результатами досліджень запропоновано розглядати, при розрахунках та дослідженнях, пилоочисний пристрій як комплекс. Цей комплекс включатиме: патрубок подачі аеродисперсної системи в сепараційну частину пиловловлювача; пристрій закрутки потоку на вході в апарат; конструкція апарату (сепараційної частини); бункер для осадження пилу. Доказано, що запропонована конструкція найбільш повно відображає особливості процесу «сухого» очищення пилогазового потоку та відкриває можливості для суттєвого вдосконалення.

Це відкриває перспективи для впровадження вихрових труб і вихрових камер та дозволяє знизити промисловий негативний вплив на атмосферу. Підприємству знадобиться збільшити капітальні витрати на встановлення нового очисного обладнання.

## **8. Висновки**

1. Доведено, що сучасні методи розрахунку не враховують деякі параметри, а саме:

- характерної структури закрученого потоку у поздовжньому та поперечному напрямку каналу, в якому рухається закручений потік;
- згасання інтенсивності закрутки по мірі віддалення потоку від завихрювача;
- зміну густини газу у радіальному напрямку під впливом відцентрових масових сил;
- зміну розподілу дисперсних часток за розмірами після проходження аеродисперсної системи завихрювачів;
- не враховуються процеси, що протікають та характерна структура потоку в патрубку подачі аеродисперсної системи в апарат пиловловлювача.

2. При розрахунках та дослідженнях запропоновано розглядати пилоочисний пристрій як комплекс. Цей комплекс включатиме наступні складові:

- патрубок подачі аеродисперсної системи в сепараційну частину пиловловлювача;
- пристрій закрутки потоку на вході в апарат;
- конструкція апарату (сепараційна частина);
- бункер для осадження пилу.

3. Для циклонної камери, враховуючи її геометричні параметри та прокольну координату, отримане рівняння, яке попередньо дозволяє оцінювати тангенційну складову швидкості обертання аеродисперсної системи в циклоні по продольній координаті. Доведено, що ця складова змінюється в залежності від інтенсивності вихору і його затухання.

## References

1. Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukraini u 2014 rotsi. Kyiv: Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, FOP Hrin D. S., 2016. 350 p. URL: <https://menr.gov.ua/files/docs/%D0%A3%202014%20%D0%A0%D0%9E%D0%A6%D0%86.pdf> (Last accessed: 20.03.2018).
2. Shvidkiy V. S., Ladigichev M. G. Ochistka gazov: handbook. Moscow: Teploenergetik, 2002. 640 p.
3. Vetoshin A. G. Protsessy i apparaty pyleochistki. Penza: Penza State University, 2005. 210 p.
4. Tkach G. A., Shaporev V. P., Titov V. M. Proizvodstvo sody po malootkhodnoy tekhnologii. Kharkiv: KhGPU, 1999. 430 p.
5. Shaporev V. P., Pitak I. V., Vasilyev M. I. K voprosu o kharaktere svyazi vody v gidrokside kaltsiya // Vestnik NTU «KhPI». Khimiya, khimicheskaya tekhnologiya i ekologiya. 2015. Vol. 50 (1159). P. 121–127.
6. Study of functioning of a vortex tube with a two-phase flow / Shaporev V. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, No. 10 (88). P. 51–60. doi:[10.15587/1729-4061.2017.108424](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108424)
7. Briankin S. S., Pitak I. V., Shaporev V. P. Tekhnika obespylivaniya na peredele obdzhiga karbonata kaltsiya // XI Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya magistriv ta aspirantiv. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. P. 11–12.
8. Pitak I. V. Study of experimental-industrial design of rotary vortex machine // Technology Audit and Production Reserves. 2014. Vol. 3, No. 2 (17). P. 33–38. doi:[10.15587/2312-8372.2014.26212](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.26212)
9. Metody uskoreniya gazodinamicheskikh raschetov na nestrukturirovannykh setkakh / Volkov K. N. et al. Moscow: FIZMATLIT, 2014. 536 p.
10. Girgidov A. D. Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika): handbook. Saint Petersburg: SPbGPU, 2002. 544 p.
11. Dyachenko N. N., Dyachenko L. N. Matematicheskaya model' techeniya polidispersnogo ansamblya tverdykh chastits v uskoryayushhikhsya potokakh // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2010.

Vol. 3 (11). P. 95–99. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access /manager/Repository/vtls:000461398>

12. Ivanov A. P. Dinamika sistem s mekhanicheskimi soudareniyami. Moscow: Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya, 1997. 336 p.

13. Dinsmore A. D., Crocker J. C., Yodh A. G. Self-assembly of colloidal crystals // Current Opinion in Colloid & Interface Science. 1998. Vol. 3, No. 1. P. 5–11. doi:[10.1016/s1359-0294\(98\)80035-6](https://doi.org/10.1016/s1359-0294(98)80035-6)

14. Analysis of the sanitary purification of gas emissions from dust in the lime manufacture / Pitak I. et al. // EUREKA: Physics and Engineering. 2017. Vol. 5. P. 65–72. doi:[10.21303/2461-4262.2017.00435](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00435)

15. Investigation of the functioning of a vortex tube in supply of disperse flow (gas – dust particles) to the tube / Shaporev V. et al. // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 4, No. 3 (36). P. 14–21. doi:[10.15587/2312-8372.2017.109172](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109172)

16. Strelets K. I., Milyukova A. A., Vatin N. I. Ochistka promyshlennykh gazov: proceedings // XXX Yubileynaya nedelya nauki SPbGTU. Part 1. Saint Petersburg: SPbGTU, 2002. P. 71–73.

17. Protopopov R. Ya., Filenko O. N., Shaporev V. P. About reactor modeling for organic impurities thermal neutralization // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012. Vol. 2, No. 12 (56). P. 22–27. URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/3925>

18. Teploenergetika pogruchnogo goreniya v reshenii problem teplosnabzheniya i ekologii Ukrainy / Tovazhnyanskiy L. L. et al. // Integrirovannyye tekhnologii i energosberezheniye. 2004. Vol. 3. P. 3–12.

19. Vatin N. I., Strelets K. I. Ochistka vozdukha pri pomoshhi apparatov tipa tsiklon. Moscow: Preprint, 2003. 213 p.

20. Batluk V. A., Proskurina I. V., Liashenyk A. V. Matematychna model protses ochyshchennia zapylenoho potoku u vidtsentrovo-inertsiiynykh pylovlovliuvachakh // Promyslova hidravlika i pnevmatyka. 2010. Vol. 1 (27). P. 31–36.

21. Khitrova I. V., Novozhilova T. B., Nechiporenko D. I. Tekhnologiya obezvrezhivaniya i utilizatsii komponentov gazovykh vybrosov: handbook. Kharkiv: NTU «KHPI», 2016. 130 p.

22. Sposoby sukhoy ochistki gaza kal'tsinatsii ot sodovoy pyli / Frumin V. M. et al. // Khimiya i tekhnologiya proizvodstv osnovnoy khimicheskoy promyshlennosti. 2016. Vol. 78. P. 52–57.

23. Thakare H. R., Monde A., Parekh A. D. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 52. P. 1043–1071. doi:[10.1016/j.rser.2015.07.198](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.198)

24. Turubaev R. R., Shvab A. V. Numerical study of swirled flow aerodynamics in the vortex chamber of the combined pneumatic machine // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2017. No. 47. P. 87–98. doi:[10.17223/19988621/47/9](https://doi.org/10.17223/19988621/47/9)

25. Shvab A. V., Popp M. Yu. Modeling of the laminar swirling flow in a vortex chamber // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2014. No. 2 (28). P. 90–97.
26. Tan F., Karagoz I., Avci A. The Effects of Vortex Finder Dimensions on the Natural Vortex Length in a New Cyclone Separator // Chemical Engineering Communications. 2016. Vol. 203, No. 9. P. 1216–1221. doi:[10.1080/00986445.2016.1160228](https://doi.org/10.1080/00986445.2016.1160228)
27. Nezhad H., Shamsoddini R. Numerical three-dimensional analysis of the mechanism of flow and heat transfer in a vortex tube // Thermal Science. 2009. Vol. 13, No. 4. P. 183–196. doi:[10.2298/tsci0904183n](https://doi.org/10.2298/tsci0904183n)
28. Deych M. E., Filippov G. A. Gazodinamika dvukhfaznykh sred. Moscow: Energiya, 1968. 423 p.
29. Justification of the calculation methods of the main parameters of vortex chambers / Pitak I. et al. // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 5, No. 3 (37). P. 9–13. doi:[10.15587/2312-8372.2017.112782](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112782)
30. Development and introduction of vortex dust catchers with swirling counter-flows / Galich R. V. et al. // Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie. 2014. No. 3. P. 12–15.